

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОЇ ПОТУЖНОСТІ ГІБРИДНИХ ІНВЕРТОРІВ ДЛЯ РОБОТИ В ІЗОЛЬОВАНИХ СИСТЕМАХ ІЗ ЗНАЧНИМ РІВНЕМ РЕАКТИВУ

Роман Грицак, аспірант, Віталій Цих, к.т.н.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна;

e-mail: roman27gri@gmail.com

Анотація

У статті представлено удосконалений метод оцінювання якості електроенергії, що генерується фотоелектричними станціями (ФЕС), з урахуванням впливу навантаження та параметрів силових перетворювачів. Запропонований підхід ґрунтується на побудові діаграм у координатах активної та реактивної потужності (P-Q) з виділенням областей допустимих та заборонених режимів роботи за критерієм загального гармонічного спотворення напруги. Для перевірки методу було проведено серію математичних моделювань у середовищі MATLAB/Simulink, де реалізовано модель гібридної ФЕС із інвертором, акумуляторною батареєю, фільтраційними елементами та блоком вимірювання основних показників якості електроенергії (ПЯЕ).

Результати моделювання показали, що форма діаграми допустимих режимів залежить від параметрів LCL-фільтра та характеру навантаження (резистивного, ємнісного чи індуктивного). Встановлено, що наявні технічні обмеження інверторів, зазначені виробниками, не завжди дозволяють дотримуватись нормативних вимог щодо рівня гармонічних спотворень, що підтверджує необхідність вдосконалення алгоритмів керування та механізмів фільтрації. Проведене порівняння результатів моделювання з даними вимірювань продемонструвало високу відповідність, що підтверджує коректність запропонованого методу.

Отримані результати мають практичне значення для проектування та експлуатації мікромереж, де основним джерелом живлення виступають ФЕС. А запропонований метод може бути використаний як основа для створення нових або оновлення чинних нормативних документів, які регламентують вимоги до якості електроенергії в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова

Фотоелектрична система; гармонічні спотворення; Matlab/Simulink модель; спотворення напруги; фільтрація вищих гармонік; математичне моделювання; метод; якість електроенергії; обмеження потужності; фотоелектростанція; гармоніки.

1. Вступ

У сучасних умовах швидкого розвитку відновлюваної енергетики все більшого поширення набувають мікромережі — автономні або напівавтономні системи електропостачання на основі ФЕС з інверторами та акумуляторними батареями. Їхнє впровадження дало змогу побутовим і промисловим споживачам частково чи повністю перейти на власну генерацію. Водночас збільшення кількості інверторних джерел потужністю до 5–7 кВт супроводжується посиленням нелінійних ефектів і погіршенням ПЯЕ — зростанням коливань напруги, гармонічних спотворень та перевантажень у колах компенсації реактивної потужності [1]. Проблема особливо актуальна для України, де мікромережі часто є єдиним джерелом живлення під час аварійних відключень.

При цьому одним із ключових аспектів розвитку систем забезпечення якості електроенергії (ЯЕ) є вдосконалення метрологічних та інформаційно-вимірювальних технологій, спрямованих на підвищення точності контролю параметрів ЯЕ у гібридних системах [2]. У цьому контексті запропонований метод і проведені дослідження відповідають сучасним напрямкам метрології енергетичних процесів, оскільки поєднують математичне моделювання, автоматизовані засоби вимірювання та аналіз гармонічних складових, що формують основу для об'єктивного оцінювання енергетичних характеристик інверторних систем.

ЯЕ визначається не лише параметрами джерела, а й характеристиками навантаження. Сучасні побутові споживачі, серед яких значну частку становлять імпульсні джерела живлення, комп'ютерна техніка, світлодіодні системи освітлення, мають низькі коефіцієнти потужності ($\cos\varphi \leq 0,5\text{--}0,7$) і генерують значні гармонійні складові [3–5]. Це призводить до появи додаткових реактивних струмів та до збільшення втрат активної потужності, що негативно впливає на роботу інверторів у підключених мікромережах [1].

Згідно з міжнародними та національними стандартами, зокрема EN 50160:2022 [6], ЯЕ визначається за граничними відхиленнями напруги, частоти, коефіцієнтів гармонічних спотворень та інших нормованих показників. Проте виробники інверторів у технічній документації зазвичай надають лише інформацію про допустимі значення коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$), що не дозволяє комплексно оцінити їхню здатність працювати з навантаженням, яке містить значну реактивну складову та вищі гармоніки [7]. Міжнародні

дослідження підтверджують, що відхилення коефіцієнта потужності від одиниці суттєво знижує надійність і скорочує термін служби інверторних перетворювачів [8]. Таким чином, для оцінювання реальних умов роботи інверторів у побутових мікромережах недостатньо аналізу лише коефіцієнта потужності; необхідно застосовувати методики, які враховують сумарний вплив активної та реактивної потужності на систему.

З огляду на це виникає потреба у метрологічно обґрунтованому підході до визначення допустимого рівня навантаження інверторів у координатах P–Q. Сучасні засоби обліку та контролю електроенергії вже дозволяють виконувати одночасні вимірювання активної та реактивної потужності, коефіцієнта потужності та ПЯЕ [7]. Це створює підґрунтя для розроблення нових методів тестування гібридних інверторів у режимах ізолюваної роботи, що дає змогу визначати критичні умови навантаження та встановлювати межі їхньої надійної експлуатації в умовах значного рівня реактивної потужності.

2. Недоліки

Наявні методи оцінювання ЯЕ у мікромережах здебільшого орієнтовані на аналіз параметрів джерела живлення або нормування окремих показників, таких як коефіцієнт потужності чи коефіцієнт гармонічних спотворень [9,10]. Однак такі підходи не враховують комплексного впливу активної та реактивної потужності на роботу інвертора в ізолюваних системах, що обмежує їхню ефективність для практичних застосувань. Виробники інверторів у технічній документації зазвичай зазначають лише допустимий діапазон $\cos \varphi$ або коефіцієнта гребня, проте ці параметри не дають повної інформації щодо надійності та стабільності роботи при підключенні навантажень зі значним вмістом реактивної складової.

Крім того, сучасні методики випробувань рідко враховують особливості якості підключеного навантаження, яке формується побутовими електроприладами з нелінійними характеристиками. Це призводить до недостатнього прогнозування режимів перевантаження інверторів, зокрема за умов одночасної дії реактивних та гармонічних складових. Унаслідок цього виникає потреба у створенні підходу, що дозволить визначати допустиме навантаження інвертора у площині координат P–Q, з урахуванням критичних режимів, характерних для ізолюваних побутових мереж.

3. Мета роботи

Мета даної роботи полягає в розробленні та перевірці нового методу оцінювання якості електроенергії, що генерується фотоелектричними станціями в мережах із великим вмістом реактиву, який базується на визначенні допустимих режимів роботи інвертора в координатах активної та реактивної потужності (P–Q) за критерієм гармонічних спотворень напруги. Реалізація цього підходу має забезпечити підвищення точності аналізу та створити передумови для вдосконалення нормативних вимог щодо роботи ФЕС у складі мікромереж.

4. Опис методу

В більшості паспортних даних до інверторів можна знайти інформацію про номінальну та максимальну потужність, допустимі значення струму і напруги (постійної та змінної), допустимі коефіцієнти потужності чи гребеня, на основі яких можна поверхнево зрозуміти вимоги до мереж в яких можна застосовувати дане обладнання. При цьому інформація про допустимі умови роботи в автономному режимі практично відсутні. Відповідно виходячи з наявних даних вказаних виробником обладнання, можна побудувати Q-P діаграму з відображенням дозволених режимів роботи.

Ключовим обмеженням є номінальна та максимальна повна потужність, яка теоретично в змінному режимі визначається як добуток діючих значень напруги і струму, а також дорівнює геометричній сумі активної і реактивної потужностей (формули 1-2):

$$S = U \cdot I \quad (1)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2)$$

де S – повна потужність, ВА; P – активна потужність, Вт; Q – реактивна потужність, вар; U – діюча напруга, В; I – діючий струм, А.

Додатково деякі з виробників встановлюють також обмеження і щодо допустимого значення коефіцієнта потужності, який в загальному вигляді визначається на основі формули 3:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3)$$

Використавши відомі розрахункові співвідношення та значення з паспортних даних інвертора, сформовано Q-P діаграму допустимих режимів роботи згідно обмежень виробників інверторного обладнання. Для цього прийнято, що номінальна повна потужність дорівнює 2 кВт, напруга 230 В, частота 50 Гц, а допустимий коефіцієнт потужності $\pm 0,8$.

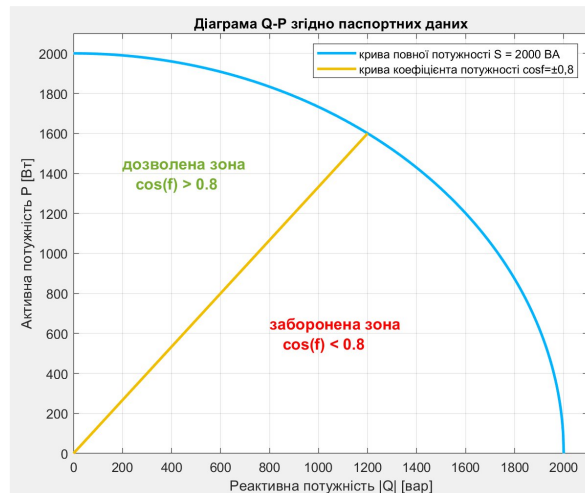


Рис. 1. Діаграма допустимих режимів роботи гібридного інвертора згідно паспортних даних

Таким чином, оскільки інвертор обмежений номінальними значеннями напруги та струму, допустимі поєднання активної й реактивної потужності (P і Q) формують обмежену область на діаграмі P – Q , яка додатково звужується вимогами до коефіцієнта потужності. Такі граничні значення, що визначені виробником, пов'язані з конструктивними особливостями інвертора та необхідністю забезпечення стабільної роботи й зменшення втрат. Зокрема обмеження коефіцієнта потужності спрямовані на зниження реактивних потоків енергії, однак не гарантують дотримання всіх вимог до ЯЕ, оскільки не враховують гармонічні спотворення, флікер чи асиметрію напруги. При цьому в побутових умовах контроль коефіцієнта потужності ускладнений відсутністю вимірювальних засобів, а сучасні споживачі (світлодіодні лампи, блоки живлення тощо) часто мають низьке його значення, що додатково погіршує ЯЕ [3–5].

Тому контроль лише коефіцієнта потужності є недостатнім і потребує доповнення комплексними методами оцінки. В свою чергу, запропонований метод забезпечує врахування допустимого рівня ЯЕ, зокрема вмісту гармонік, та базується на обмеженнях, встановлених виробником, і характеристиках навантаження. Метод передбачає вимірювання напруги, струму, сумарного рівня гармонічних спотворень (СКГС, THD), активної й реактивної потужності та $\cos \varphi$ при зміні реактивної складової навантаження. В даному випадку найбільші спотворення спостерігаються при паралельному підключенні R–С навантажень, коли в мережі різко зростає ємнісна реактивна потужність, що призводить до збільшення гармонічних спотворень і погіршення стабільності роботи інвертора. З іншої сторони при наявності індуктивної складової реактивні потоки частково компенсуються, і показники якості поліпшуються. Отже, R–С навантаження є найбільш критичним режимом для гібридних інверторів. Вимоги до допустимого рівня спотворень визначені стандартом EN 50160 [11].

Метод дозволяє визначати межі допустимих значень активної та реактивної потужності інвертора шляхом покрокової зміни P і Q до перевищення допустимого СКГС, а отримані результати формують діаграму P – Q із урахуванням особливостей роботи гібридного інвертора в автономній мережі. Накладання ізолейн коефіцієнта потужності дозволяє виявляти «погані» навантаження, що спричиняють перевищення струмових обмежень чи відхилення напруги.

Узагальнено метод можна описати наступною послідовністю дій:

Попередні вимірювання в мікромережі для якої передбачено використання гібридної ФЕС: на цьому етапі визначаються наявні споживачі в ізолюваній системі, їх активні та реактивні потужності, коефіцієнти потужності та форми споживаних навантажень. Вимірювання проводяться аналізатором мережі або ватметром класу не гірше 0,5. Цей крок дозволяє встановити, які поєднання P та Q притаманні наявному навантаженню, та визначити діапазони тестових навантажень

Випробування інвертора: Для точного визначення меж допустимого активного та реактивного навантаження (P – Q) гібридного інвертора в ізолюваній мікромережі пропонується комплексна серія випробувань, що передбачає систематичне дослідження поведінки інвертора при різних поєднаннях активної та реактивної потужності. Ці випробування включають наступні етапи:

Задання початкових значень: Задается базовий активний опір (резистивне навантаження) який відповідає номінальній потужності інвертора з нульовою або мінімальною реактивною складовою. Перевіряється рівень СКГС і у разі не перевищення допустимих значень реєструються вихідні параметри інвертора: величини U , I , P , Q , $\cos \varphi$, СКГС. В протилежному випадку вимірювання повторюються з нижчим базовим опором.

Покрокове додавання реактивної складової: До базового навантаження поступово підключають реактивну складову через регульований конденсатор (або паралельно підключені R–С елементи). При кожному новому

кроці змінюють значення ємності (або співвідношення R і C у паралелі), що призводить до збільшення Q за незмінної (або відомо відрегульованої) повної потужності S .

Вимірювання характеристик: На кожному кроці фіксують ті ж параметри (U , I , P , Q , $\cos\phi$, СКГС). Визначається момент, коли відбувається перевищення допустимих значень СКГС наруги понад нормативних 8%.

Фіксація граничних умов: Додатково відслідковується не перевищення встановлених на початку граничних меж (наприклад, номінальний струм або максимальна повна потужність інвертора). В таких випадках фіксуються значення та зупиняється проведення вимірювань.

Побудова кривої допустимої потужності: По зібраних даних будується діаграма P – Q , де область під кривою демонструє допустимі комбінації потужностей. Ця діаграма враховує обмеження струму та напруги інвертора, як і наведено в теоретичних формулах 2.

Перевірка «негативних сценаріїв»: за потреби окрім ємнісних навантажень можуть бути досліджені індуктивні режими або асиметричні навантаження, але в гібридних системах індуктивну реактивну потужність часто компенсують конденсаторами. Також можуть додатково тестуватися нестандартні випадки: переривчасті навантаження, нехарактерні частоти тощо.

Детально алгоритм проведення випробування інвертора наведено на рисунку 2.

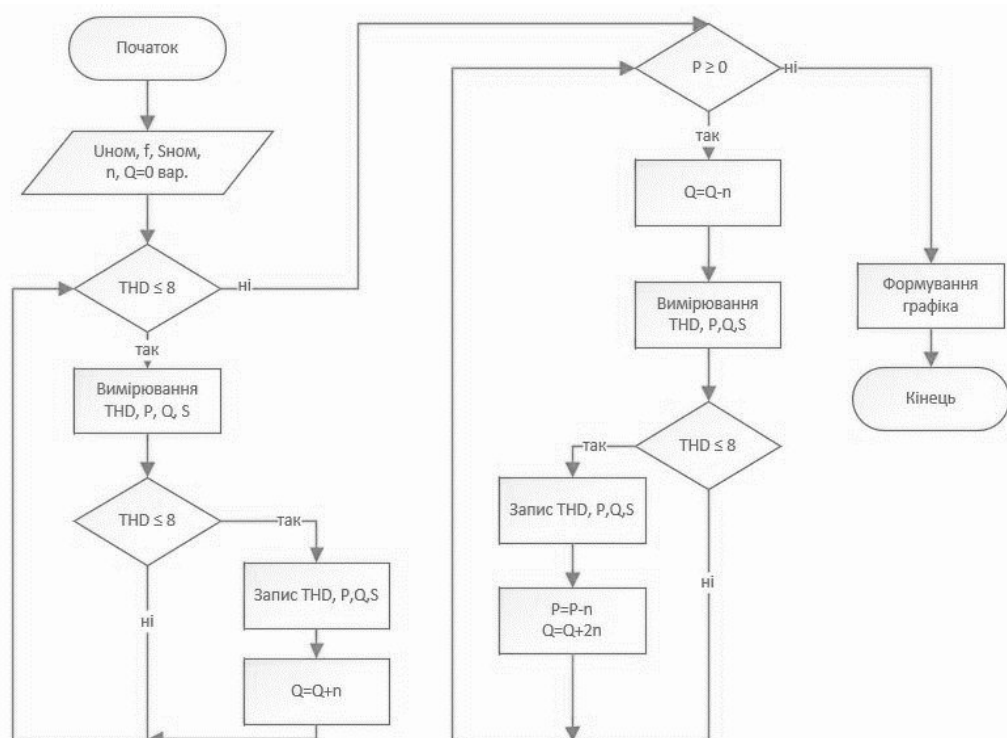


Рис. 2. Блок-схема алгоритму проведення вимірювань

Для застосування даного методу необхідно використовувати засоби вимірювальної техніки, які повністю відповідають вимогам нормативних документів щодо класу точності та функціональних можливостей. Зокрема, під час проведення випробувань обов'язково застосовують аналізатор якості електроенергії, який повинен відповідати не нижче стандарту S згідно з ДСТУ EN 61000-4-30, забезпечувати реєстрацію діючих значень напруги та струму, визначення активної та реактивної потужності, коефіцієнта потужності, гармонійних спотворень з класом точності не нижче 0,5. Аналізатор якості повинен мати можливість зберігати дані у реальному часі та підтримувати функції побудови гістограм, часових рядів і кривих P – Q для подальшого аналізу допустимих режимів роботи інвертора. Контроль форми кривої струму та напруги виконується за допомогою осцилографа, який має відповідати вимогам IEC 61010-2-030 та національного стандарту ДСТУ EN 61010-2-030:2015 щодо вимірювальної безпеки та точності. Осцилограф забезпечує високу частоту дискретизації (не менше 1 МГц) та можливість вимірювати короточасні піки струму, а також контролювати виникнення високочастотних гармонік, які не завжди фіксуються аналізаторами якості. Визначення активної та реактивної потужності на етапі випробувань здійснюється ватметром/клір-ваттметром із класом точності не нижче 0,5–1, який відповідає вимогам ДСТУ IEC 60051-1:2016 та IEC 60051-3, що забезпечує вимірювання трифазних та однофазних систем, фіксацію миттєвих та усереднених значень P і Q , а також підтримує функції реєстрації енергетичних потоків для побудови діаграм P – Q та аналізу допустимих режимів навантаження інвертора. Контроль миттєвих значень струму та напруги в критичних режимах випробувань доцільно виконувати за допомогою амперметра та вольтметра класу точності не нижче 0,5, які дозволяють здійснювати

додатковий моніторинг під час перевантажень або різких змін навантаження, а також уточнювати значення $\cos\phi$ на кожному етапі тестування. Всі вимірювальні прилади повинні проходити періодичну повірку відповідно до ДСТУ 2534-94 та міжнародних рекомендацій щодо метрологічного контролю електрообладнання, що забезпечує достовірність і відтворюваність результатів випробувань. Таким чином, застосування засобів вимірювальної техніки із відповідними характеристиками дозволяє забезпечити точність визначення меж допустимого P–Q навантаження, контроль якості електроенергії та виявлення критичних режимів роботи інвертора, що особливо важливо для мікромереж на основі гібридних ФЕС.

Безпосередньо випробування потрібно проводити за стандартних умов (температура навколишнього середовища близько $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ (вплив теплових режимів на інвертор мінімальний), частота 50 Гц стабільна.) Після кожного регулювання навантаження необхідно очікувати стабілізації системи ($\sim 30\text{--}60$ с) перед фіксацією показників, тобто завершення перехідних процесів. Час спостереження в кожному режимі – не менше 10 хвилин для усереднення вимірів, що відповідає вимогам EN 61000-4-30 і дозволяє коректно визначати гармонійні спотворення струму та напруги (СКГС) у стабільному режимі роботи інвертора. Такий інтервал забезпечує достатню кількість вимірювань для точного усереднення, зменшує вплив короточасних пульсацій та дозволяє отримати репрезентативні значення СКГС для аналізу допустимих режимів P–Q.

Переваги запропонованого підходу над традиційними методами визначення допустимої потужності інвертора в автономному режимі роботи полягають у його комплексності та наближеності до реальних умов. Замість простого паспортного тестування на активне навантаження ($\cos\phi=1$) або консервативних розрахунків за номіналом, метод використовує безпосереднє вимірювання динамічних режимів. Це забезпечує:

- визначення реального граничного навантаження з урахуванням необхідності забезпечення якості енергії (високий THD одразу виявляються);
- можливість виявити «непридатні» режими – наприклад, коли інвертор виходить з ладу не за перевищення номінальної активної потужності, а через особливості навантаження;
- адаптивність до конкретної мікромережі через врахування попередніх показників навантаження та умови роботи мережі.

Таким чином, підхід дозволяє точніше обґрунтувати граничні значення P і Q, а отже – підвищити надійність і безпеку роботи автономного гібридного джерела без надмірного заниження чи завищення його допустимого навантаження.

Проведений метод аналізу ґрунтується на перевірених у практиці законах електротехніки і виконується за допомогою стандартних вимірювальних засобів.

Моделювання

5.1 Опис математичної моделі

Для перевірки запропонованого методу визначення допустимого P–Q навантаження гібридного інвертора було проведено математичне моделювання у середовищі MATLAB Simulink. Удосконалена математична модель гібридної ФЕС відрізняється тим, що дозволяє здійснювати моделювання сумісної роботи гібридних інверторів напруги з нелінійним електричним навантаженням активного, реактивно-індуктивного та реактивно-ємнісного характеру. Такий підхід забезпечує можливість проведення експериментів у контрольованих умовах без необхідності фізичного випробування обладнання, що особливо важливо для побутових мікромереж малої потужності та дозволяє досліджувати критичні поєднання активної та реактивної потужності, які часто супроводжуються підвищеними гармонічними спотвореннями. Принципова схема електричного кола та математична модель наведені на рисунках 3-4.

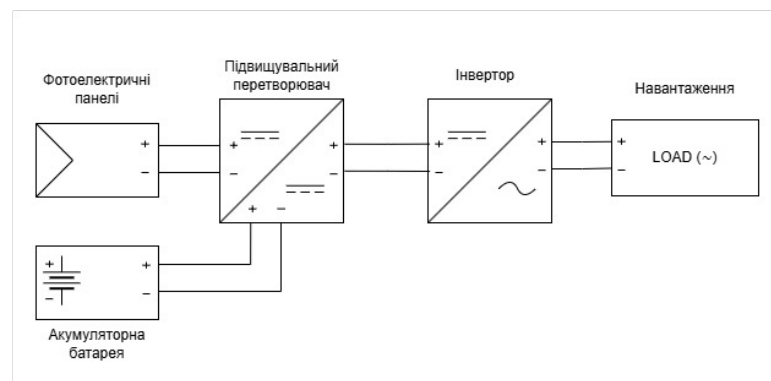


Рис. 3. Принципова електрична схема гібридної ФЕС

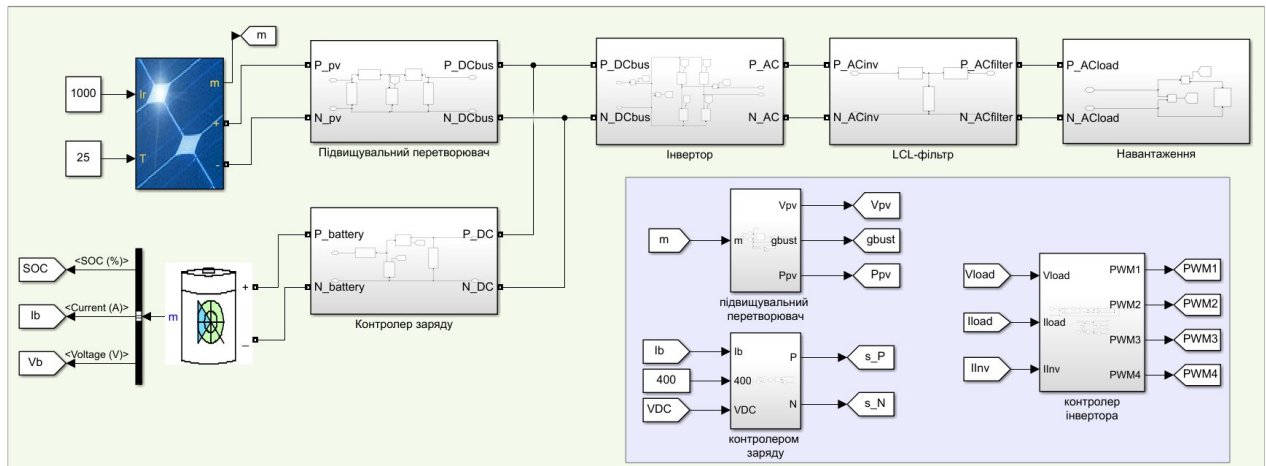


Рис. 4. Математична модель гібридної ФЕС в середовищі MATLAB Simulink

Для побудови моделі була використана структура гібридної ФЕС, яка включає масив фотоелектричних модулів, блок підвищення постійної напруги (DC–DC конвертер), акумуляторну батарею з контролером заряду, інвертор і LCL-фільтр на виході. Фотоелектричний масив моделює виробництво електроенергії залежно від рівня освітленості та температури, DC–DC конвертер забезпечує підтримку стабільної напруги на шинах постійного струму, а інвертор разом з LCL-фільтром формує синусоїдальну напругу змінного струму для навантаження. Акумуляторна батарея дозволяє досліджувати режим роботи системи при різних рівнях заряду та розряду, що імітує реальні умови експлуатації мікромереж. Основні параметри моделі наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Основні параметри simulink моделі гібридної ФЕС

Параметр	Значення
Номінальна потужність фотоелектричного масиву (Вт)	2094
Напруга шини постійного струму (В)	400
Ємність акумуляторної батареї (А*год)	100
Номінальна потужність інвертора (ВА)	2000
Тип фільтра	LCL-фільтр
Частота дискретизації моделі (Ts)	10e ⁻⁶
Тривалість тестового режиму	2,5

Імітацію навантаження було реалізовано за допомогою блоків Serial та Parallel RLC-branch, що дозволяє задавати різні комбінації резистивних, індуктивних та ємнісних елементів у мережі. Такий підхід дозволяє змінювати коефіцієнт потужності навантаження, аналізувати вплив реактиву на стабільність роботи інвертора та проводити побудову діаграм P–Q для різних режимів роботи системи. Модель також підтримує збір даних про миттєві та усереднені значення напруги, струму та потужності, що необхідно для перевірки коректності запропонованого методу та оцінки ЯЕ. В свою чергу, визначення параметрів елементів R, L, C здійснювалось згідно з відомими співвідношеннями між активною, реактивною та повною потужностями для синусоїдальних електричних кіл змінного струму [12], які наведено у формулах (4–9). Для послідовного підключення всіх елементів:

$$R = \frac{P \cdot U^2}{S^2}; L = \frac{Q \cdot U^2}{2\pi f S^2}; C = \frac{S^2}{2\pi f Q U^2} \quad (4-6)$$

де – R- активний опір, Ом; L – індуктивність, Гн; C – ємність, Ф; f – частота, Гц.

Для паралельного підключення всіх елементів:

$$R = \frac{U^2}{P}; L = \frac{U^2}{2\pi f Q}; C = \frac{Q}{2\pi f U^2} \quad (7-9)$$

Важливою складовою побудованої моделі є блок вимірювань, функціонування якого спрямоване на отримання ключових характеристик роботи інвертора та навантаження. Даний блок наведено на рисунку 5.

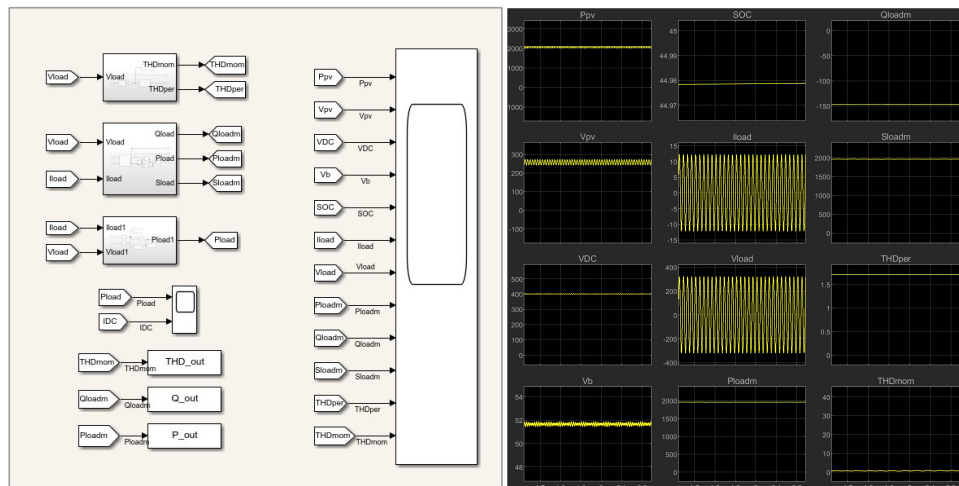


Рис. 5. Блок вимірювань побудованої моделі в середовищі MATLAB Simulink

У цьому блоці реалізовано визначення активної, реактивної та повної потужності на основі даних про струм і напругу на виході інвертора. Для цього застосовано математичні підсистеми, що обчислюють миттєві та усереднені значення, забезпечуючи достовірну оцінку режимів роботи системи. Додатково реалізовано розрахунок загального гармонічного спотворення напруги (THD), який використовується для аналізу якості електроенергії відповідно до вимог міжнародних стандартів.

Передбачено інтеграцію засобів візуалізації у вигляді осцилограм та індикаторів ключових параметрів, що дає змогу відслідковувати динаміку процесів у реальному часі. Блок вимірювань включає багатоканальну систему збору даних із підсистем навантаження та фотоелектричної установки, які подаються на блоки обробки сигналів. Це дозволяє відтворювати повну картину роботи гібридної сонячної станції за змінних умов навантаження та автоматично формувати вихідні параметри для побудови діаграм P-Q.

Керування моделлю у середовищі MATLAB/Simulink здійснюється спеціалізованим скриптом, що автоматизує зміну параметрів навантаження, розрахунок RLC-елементів за формулами (4–9) і збір результатів моделювання. Програмний код забезпечує перевірку проміжних результатів та формує масиви даних для подальшого аналізу. Після завершення симуляції скрипт будує діаграму залежності реактивної та активної потужності (Q-P) з нанесенням кривих повної потужності та меж коефіцієнта потужності. Отримані результати автоматично зберігаються у вигляді таблиць і графіків, що спрощує подальшу обробку та використання для верифікації запропонованого методу.

5.2 Результати моделювання

З метою перевірки працездатності запропонованого методу було проведено серію моделювань у середовищі MATLAB/Simulink. Основна увага була зосереджена не на відтворенні повної моделі мікромережі, яка вже розглядалася раніше, а на тестуванні алгоритму визначення допустимого P-Q навантаження інвертора. Для цього було реалізовано серію сценаріїв із варіацією параметрів навантаження, визначенням ЯЕ та побудовою робочих кривих. Таким чином, моделювання виконувало функцію перевірки адекватності розробленого методу та дозволило оцінити її точність у різних режимах.

Спершу було поставлене завдання перевірити, за якої комбінації підключеного навантаження RLC досягаються найбільші спотворення якості електроенергії. Оскільки як і зазначено вище теоретично найбільші спотворення повинні бути досягнуті при паралельному підключенні R-C елементів. Щоб підтвердити це проведено моделювання при різних комбінаціях параметрів активного опору, індуктивності та ємності, що дозволило простежити вплив характеру навантаження на гармонічний склад напруги та струму. Для моделювання були використані стандартні налаштування та параметри гібридної ФЕС, які вказані у таблиці 1 та лише змінювались характеристики навантаження. Отримані результати, які наведені на рисунку 6 дали змогу визначити критичний режим, який необхідно використовувати при оцінюванні допустимого навантаження інвертора.

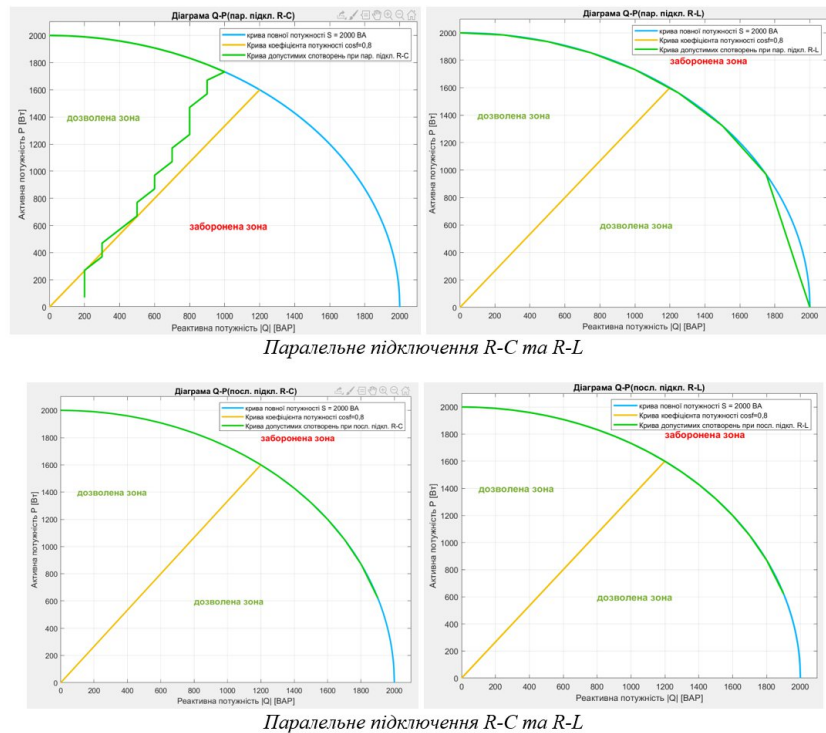


Рис. 6. Результати побудови Q-P діаграм при різних конфігураціях підключеного навантаження

Отримані результати моделювання підтверджують припущення щодо залежності рівня гармонічних спотворень від характеру навантаження. Зокрема, у випадку паралельного підключення ємнісної складової (R-C) спостерігається перевищення допустимих значень, що проявляється у формуванні забороненої зони. Це повністю відповідає прогнозованим результатам, оскільки резонансні ефекти при взаємодії інвертора з ємнісним навантаженням підсилюють гармонічні складові.

Натомість для паралельного або послідовного підключення індуктивного навантаження (R-L) чи послідовного з'єднання R-C гармонічні спотворення залишаються в межах допустимого рівня. Це пояснюється тим, що індуктивна складова діє як природний фільтр для вищих гармонік, а при послідовному з'єднанні R-C відсутні умови для різкого зростання резонансних явищ. Таким чином, отримані криві допустимих спотворень мають фізично обґрунтований характер і підтверджують коректність застосованого підходу.

Подальші моделювання були спрямовані на перевірку коректності формування робочої кривої інвертора згідно із запропонованим методом. Для цього при однакових вихідних параметрах моделі проведено моделювання, під час якого визначався коефіцієнт гармонічних спотворень напруги для всієї області зміни навантаження. Паралельно відповідно до алгоритму методу було побудовано діаграму залежності P-Q з урахуванням обмежень по СКГС. Це дозволило зіставити результати чисельних експериментів із даними, отриманими за методикою, та оцінити точність побудови кривої.



Рис. 7. Результати визначення СКГС и на площині та побудови кривої допустимих спотворень

Отриманий графік, сформований шляхом накладання результатів моделювання на площину P-Q, демонструє коректність роботи запропонованого методу. Видно, що крива допустимих спотворень, побудована згідно алгоритму, практично співпадає з результатами обчислення загального гармонічного спотворення напруги (СКГС), визначеного у процесі повного моделювання для всієї площини навантаження з кроком 250 Вт. Це підтверджує, що методика дозволяє точно відтворити межу між зонами допустимого та недопустимого режиму роботи інвертора без необхідності проведення значної кількості окремих моделювань. Збіг розрахункових та експериментально отриманих кривих свідчить про правильність закладених у метод алгоритмічних залежностей та їх відповідність фізичним процесам. Зокрема, відзначається чітке відтворення граничної лінії у тих діапазонах, де резонансні ефекти та комбінації навантаження R-C могли б призводити до підвищення гармонічних спотворень. Це забезпечує підтвердження того, що метод може бути застосований для швидкої оцінки електромагнітної сумісності фотоелектричних інверторів у широкому діапазоні навантажень.

Окрему увагу приділено перевірці коректної роботи запропонованого методу при різних конфігураціях інвертора. Для цього було проведено серію моделювань при яких навантаження не змінювалось але змінювались параметри LCL- фільтра інвертора, що безпосередньо призначений для зниження вищих гармонік у вихідній напрузі. Отримані результати наведено на рисунку 8.

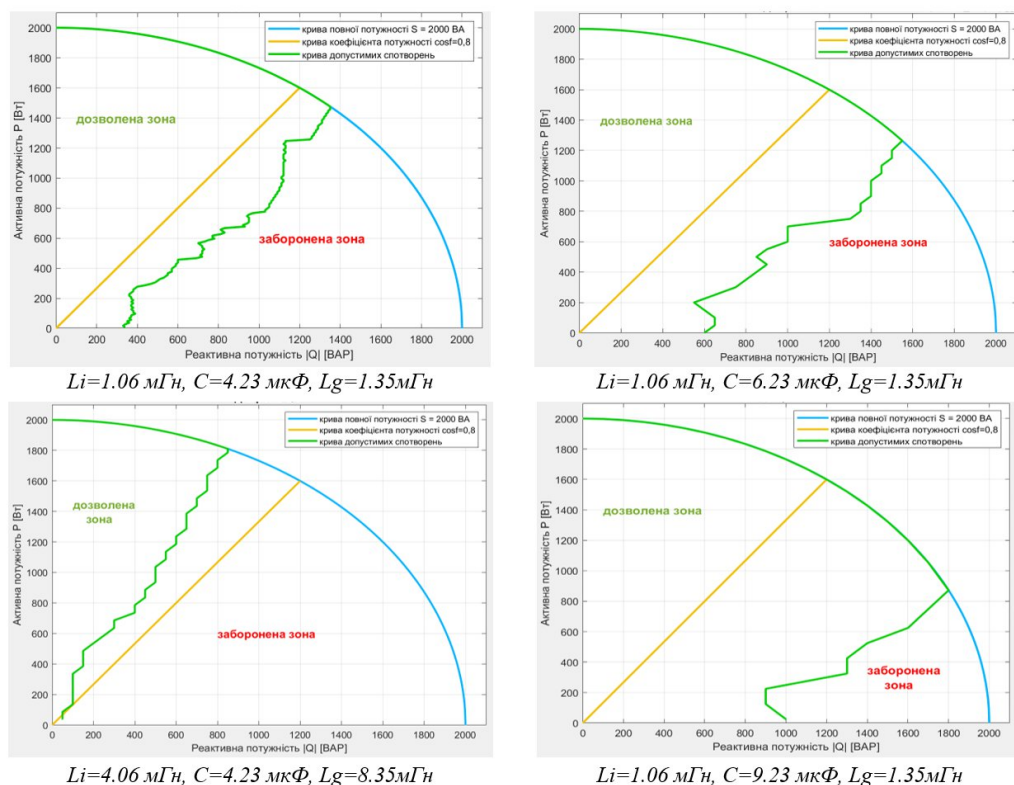


Рис. 8. Результати побудови кривої допустимих спотворень при різних параметрах LCL- фільтра

Відповідно до проведеної серії моделювань підтверджено, що форма отриманої кривої істотно залежить від параметрів гібридної ФЕС, зокрема від характеристик LCL-фільтра. Це повністю узгоджується з відомими дослідженнями, де наголошується, що ефективність фільтрації гармонічних складових визначає не лише рівень електромагнітної сумісності системи, але й можливість забезпечення ширшого робочого діапазону при змінних навантаженнях [13,14]. Отже, підтверджено ключове припущення, що оптимізація параметрів фільтра є визначальним чинником у зменшенні спотворень та формуванні допустимої області роботи в координатах Q-P. Згідно з отриманими результатами чітко виявлено, що обмеження, які наразі встановлюють виробники обладнання, не дозволяють у повному обсязі забезпечити відповідність вимогам до рівня гармонічних спотворень. Така невідповідність уже неодноразово відзначалась у міжнародних публікаціях, де підкреслюється, що реальні умови експлуатації мікромереж значно відрізняються від умов лабораторних випробувань, а отже, нормативні підходи потребують перегляду [15]. Водночас результати моделювання демонструють, що удосконалення алгоритмів методу визначення допустимих режимів роботи інверторів в мережах з значним вмістом реактиву дозволяє вирішити дану проблему.

Важливо зазначити, що при високій ефективності фільтрації досягається розширення області допустимих режимів, що підвищує гнучкість системи при роботі з різними типами навантажень. Натомість при низькому рівні фільтрації виникає протилежний ефект: зменшення робочої області та обмеження використання інвертора.

у певних комбінаціях Q-P. Це підтверджує необхідність інтеграції більш досконалих механізмів активного придушення гармонік, таких як адаптивні алгоритми управління струмом та методи цифрової компенсації [16]. Таким чином, результати роботи вказують на потребу в створенні або оновленні нормативних документів, які б чітко регламентували вимоги до якості електроенергії у мікромережах із високим рівнем інтеграції ФЕС. Зокрема, варто врахувати сучасні міжнародні стандарти, такі як IEEE 1547-2018 [17] та IEC 61000-4-30:2015 [10], але з адаптацією до умов автономної та гібридної генерації, де характерні вищі рівні гармонічних спотворень. Відсутність таких вимог на національному рівні може призвести до того, що обладнання формально відповідатиме чинним нормам, але на практиці не забезпечуватиме стабільної роботи мікромережі. В свою чергу, при розробленні даних стандартів варто взяти до уваги запропонований в даній роботі метод.

6. Висновки

Вперше розроблено метод визначення допустимого рівня електричного навантаження для мікромереж із гібридними фотоелектричними системами, що працюють в автономному режимі. Метод базується на аналізі граничного значення сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень (СКГС), що дозволяє враховувати тип та характер підключеного навантаження. Це забезпечує об'єктивну оцінку впливу споживачів на якість електроенергії та стабільність роботи інверторів у автономних системах.

Також розроблено удосконалену математичну модель гібридної ФЕС, яка дозволяє моделювати сумісну роботу гібридних інверторів напруги з нелінійним електричним навантаженням активного, реактивно-індуктивного та реактивно-ємнісного характеру. Модель забезпечує оцінку режимів роботи системи, у тому числі критичних, та дозволяє прогнозувати вплив нелінійних ефектів на якість електроенергії в реальних умовах експлуатації.

Запропонований підхід дозволяє поєднати математичне моделювання, метрологічний контроль та аналіз гармонічних спотворень, що є важливим для оптимізації роботи автономних мікромереж. Результати моделювання можуть бути використані для проектування систем з підвищеною стійкістю до коливань навантаження, для перевірки допустимих режимів роботи інверторів та планування стратегії енергоменеджменту.

Практична значущість методики полягає у можливості метрологічної оцінки допустимого навантаження без фізичних випробувань обладнання, що особливо актуально для побутових і промислових мікромереж малої потужності. Метод створює основу для подальших досліджень у сфері метрології та стандартизації електроенергії, зокрема для вдосконалення методів вимірювання, контролю та забезпечення відповідності параметрів електроенергії у системах з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) вимогам міжнародних стандартів, таких як EN 50160.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи немає.

Список використаної літератури

- [1] A. Mohammed, E. K. Sakr, and M. Abo-Adma, "A comprehensive review of advancements and challenges in reactive power planning for microgrids," *Energy Informatics*, vol. 7, no. 1, p. 63, Aug. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00341-3>.
- [2] R. I. Hrytsak and A. V. Yavorsky, "Problems of Power Quality in Microgrids Based on Hybrid Photovoltaic Systems," *Visnyk VPI*, no. 4, pp. 22–31, Aug. 2025.
- [3] A. A. Zhirnova, V. V. Zhirnov, and S. N. Tkachenko, "The Influence of LED Lighting Sources on the Nature of Power Consumption and Power Quality Indicators," *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 1479, Jun. 2018, doi: 10.3390/en11061479.
- [4] A. S. Lapacheva, A. V. Lebedev, and A. S. Lebedeva, "Research of the Negative Influence of Dimmed LED Lighting on Power Quality Indicators," *Sustainability*, vol. 13, no. 17, p. 9753, 2021, doi: 10.3390/su13179753.
- [5] I. P. Kaur, M. Aggarwal, and A. L. Sharma, "Effects of Waveform Distortion for Household Appliances on Power Quality," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 14, pp. 2137–2147, Sep. 2019, doi: 10.1007/s42835-019-00227-3.
- [6] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), "EN 50160:2022 - Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks," Dec. 2022. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/083c552d-f4b8-4373-a5ec-8a27b6c8d37d/en-50160-2022>
- [7] R. Haghighi, V.-H. Bui, M. Wang, and W. Su, "Survey of reliability challenges and assessment in power grids with high penetration of inverter-based resources," *Energies*, vol. 17, no. 21, p. 5352, Nov. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en17215352>.
- [8] R. Thiagarajan, A. Nagarajan, P. Hacke, and I. Repins, "Effect of reactive power on photovoltaic inverter reliability and lifetime: Preprint," National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, NREL/CP-5D00-73648, Sep. 2019. [Online]. Available: <https://docs.nrel.gov/docs/fy19osti/73648.pdf>.

- [9] R. Haghighi, V.-H. Bui, M. Wang, and W. Su, "Survey of reliability challenges and assessment in power grids with high penetration of inverter-based resources," *Energies*, vol. 17, no. 21, p. 5352, Nov. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/en17215352>
- [10] International Electrotechnical Commission (IEC), "IEC 61000-4-30:2015 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods," Feb. 2015. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/21844>.
- [11] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), "EN 50160:2022+A1:2025 - Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks," Jan. 10, 2023. [Online]. Available: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/c8691375-8082-4c4c-8a5d-01b79af10f85/en-50160-2022-a1-2025>.
- [12] S. I. Bielov, *Teoriia elektrychnykh kil.* Kyiv: Vyshcha shkola, 2009.
- [13] B. Singh, S. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "Power quality issues and their mitigation in microgrids: A comprehensive review," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 4012–4029, Jul.-Aug. 2020. [Online]. Available: doi: 10.1109/IICPE.2016.8079543.
- [14] Y. Yang, H. Xiao, L. Lu, and F. Blaabjerg, "LCL filter design and control in grid-connected converters: An overview," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 109, pp. 1–15, Feb. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.043>.
- [15] D. Graovac, M. Knezović, and D. Žarko, "Harmonic mitigation challenges in microgrids," *Electric Power Systems Research*, vol. 195, p. 107155, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107155>.
- [16] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Active power filters and modern control strategies for power quality improvement," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 20–31, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/MIE.2018.2813278>.
- [17] IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces, IEEE Std. 1547-2018, Jul. 27, 2018. [Online]. Available: <https://standards.ieee.org/standard/1547-2018.html>.

ISSN: 2617-846X (online)

Грицак Роман Ігорович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7220-1690>

Цих Віталій Сергійович

Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9095-4099>

Дата отримання статті -17.09.25.

Дата отримання фінального варіанту – 01.12.25.

Дата публікації- 30.12.25.